



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE

## FLORE

# Repository istituzionale dell'Università degli Studi di Firenze

### **Adeguamento sismico di edifici in cemento armato mediante il sistema a cavi smorzanti**

Questa è la Versione finale referata (Post print/Accepted manuscript) della seguente pubblicazione:

*Original Citation:*

Adeguamento sismico di edifici in cemento armato mediante il sistema a cavi smorzanti / S. Sorace; G. Terenzi; F. Fadi. - ELETTRONICO. - 1:(2007), pp. 145-1-145-12. (Intervento presentato al convegno XII Convegno Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia" tenutosi a Pisa nel 10-14 giugno 2007).

*Availability:*

This version is available at: 2158/342259 since: 2018-03-18T09:21:00Z

*Publisher:*

Edizioni Plus

*Terms of use:*

Open Access

La pubblicazione è resa disponibile sotto le norme e i termini della licenza di deposito, secondo quanto stabilito dalla Policy per l'accesso aperto dell'Università degli Studi di Firenze (<https://www.sba.unifi.it/upload/policy-oa-2016-1.pdf>)

*Publisher copyright claim:*

(Article begins on next page)

# Adeguamento sismico di edifici in cemento armato mediante il sistema a cavi smorzanti

Stefano Sorace<sup>1</sup>, Gloria Terenzi<sup>2</sup>, Fabio Fadi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Udine, Via delle Scienze 208, 33100 Udine

<sup>2</sup>Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Firenze, Via di S. Marta 3, 50139 Firenze

*Keywords: Seismic retrofit; Advanced seismic protection; Damping; Damped cables; Analytical models; Computational models; Non-linear dynamic analysis.*

## ABSTRACT:

This paper reports the most recent advancements of the research activities on the damped cable system for the seismic protection of new and existing frame buildings. These new activities concern the final definition of the computational model of the system, suitable for use with commercial finite element programs; the evaluation of further high-performing geometrical layouts of the cables; and the simulated application of this technology to representative case studies. The analyses carried out on two reference plane frames in order to test the computational model capabilities, to validate it by comparison with the results of the analytical model of the system formulated at previous stages of this research, and to verify the effectiveness of the new cable layouts examined, are initially summed up. A seismic retrofit hypothesis of a wing of the hospital of Latisana, in the Friuli region, is then presented. This hypothesis is detailed with regards to the application of the preliminary design procedure of the system, the study of cable geometry in relation to its architectural insertion, and the evaluation of seismic performance before and after the intervention proposed.

## 1 INTRODUZIONE

Il sistema a cavi smorzanti costituisce una soluzione innovativa di protezione sismica passiva degli edifici con struttura intelaiata, di nuova realizzazione od esistenti. Tale tecnologia è costituita da coppie di cavi pretesi, disposti simmetricamente, ognuno dei quali è collegato all'estremità inferiore ad un dissipatore fluido-viscoso a matrice siliconica, ancorato alla fondazione, e superiormente ad uno dei più elevati solai di piano, con contatti scorrevoli in corrispondenza dei restanti impalcati. Tali contatti sono realizzati mediante opportuni deviatori che consentono, altresì, di determinare la geometria dei cavi lungo l'altezza dell'edificio. L'interazione tra cavi pretesi e telai ai vari livelli, unitamente all'azione smorzante offerta dai dispositivi fluido-viscosi, dà luogo ad un efficace controllo progettuale della prestazione strutturale sotto sisma.

Il sistema, originariamente concepito e definito nelle sue linee essenziali in (Peckan et al. 2000a, b), è stato approfonditamente analizzato nell'ambito del Progetto di Ricerca europeo "SPIDER" sotto i profili sperimentale, di modellazione, progettuale, tecnologico, di produzione industriale e di pratica installazione (Behloul et al. 2001, Sorace e Terenzi 2001,

2003a,b, 2004, 2006). Tale tecnologia è tuttora oggetto di studio da parte degli autori, con particolare riguardo agli aspetti di modellazione mediante programmi di calcolo a diffusione commerciale, di ricerca della geometria ottimale dei cavi in relazione ai dovuti vincoli di compatibilità architettonica e funzionale, e di simulazione progettuale in potenziali casi applicativi d'interesse.

Una sintesi di tali approfondimenti è presentata in questa memoria, partendo dal modello computazionale più avanzato ed efficiente messo a punto ai fini progettuali, del quale è verificata l'efficienza per confronto con le risposte del modello analitico precedentemente definito e convalidato su base sperimentale. Viene quindi presentato un riepilogo delle indagini numeriche di valutazione delle prestazioni del sistema in funzione del tracciato dei cavi, esaminando nuove forme sin qui non esplicitamente considerate. L'attenzione è, infine, posta sulla formulazione di un'ipotesi applicativa, consistente nell'adeguamento di un padiglione dell'Ospedale civile di Latisana, in provincia di Udine, rappresentativo di un'ampia classe di edifici pubblici pre-normativi con struttura in cemento armato. Per tale caso di studio sono esemplificativamente utilizzati la procedura di progetto formulata in (Sorace e Terenzi 2002, 2004) ed il modello computazionale completo

dell'edificio, presentando una sintesi delle analisi strutturali condotte in campo dinamico non lineare. È, inoltre, esaminato il percorso di ricerca della configurazione ottimale d'installazione, valutando i benefici dell'intervento a partire dall'analisi dello stato di fatto, unitamente ad alcuni dettagli tecnici di montaggio.

## 2 MODELLO COMPUTAZIONALE DEL SISTEMA

Ai fini dello svolgimento di analisi sismiche in campo dinamico, l'aspetto maggiormente caratterizzante la riproduzione della risposta del sistema, all'interno del modello computazionale della struttura che lo contiene, è rappresentato dai contatti scorrevoli di piano. Questi, infatti, costituiscono la prima fonte di non linearità del problema numerico, unitamente a quella, di tipo costitutivo, legata al comportamento dei dissipatori viscosi. Ad un livello di simulazione numerica massimamente raffinato, l'interazione tra cavo ed impalcato può essere riprodotta utilizzando elementi finiti propriamente "di contatto", presenti nelle librerie di base di programmi non lineari multi-obiettivo, nella fattispecie atti a simulare lo scorrimento relativo del corpo cilindrico del cavo all'interno della superficie tubolare coassiale del deviatore. I fitti reticoli di elementi isoparametrici necessari a modellare il tratto interessato del cavo e la superficie del deviatore, in aggiunta ai connettori non lineari che controllano lo stato del contatto ad ogni passo del processo d'integrazione, rendono proibitiva una tale soluzione nel contesto di analisi dinamiche al passo da sviluppare a scopi progettuali.

Al fine di rendere la tecnologia a cavi smorzanti efficacemente modellabile anche con programmi di calcolo strutturale ad ampia diffusione nella comunità professionale, come SAP2000NL (CSI 2006), si è provveduto a riprodurre il contatto concentrandolo in un singolo punto, sdoppiato in un nodo scorrevole (solidale al cavo) ed un nodo "fisso" (solidale all'impalcato), caratterizzati dalla stessa posizione geometrica iniziale. L'ipotesi sottintesa è che il tratto del cavo a contatto fisico con la guida interna al deviatore presenti un atto di moto rigido attorno al centro di istantanea rotazione del deviatore stesso (Sorace e Terenzi 2006). Il modello computazionale del contatto è mostrato in Figura 1, nella trasposizione dal dettaglio strutturale al corrispondente schema agli elementi finiti, in cui l'elemento BC rappresenta un collegamento elastico ("nllink") ad elevata rigidità tra il centro di curvatura C ed il nodo di contatto scorrevole B. Tale collegamento produce un effetto "puleggia" che obbliga B a muoversi secondo una traiettoria definita dalla forma del deviatore stesso. L'azione esercitata dal cavo è trasferita alla struttura mediante l'asta rigida AC, che

connette C al nodo di contatto fisso A. A tale asta viene attribuito un vincolo cinematico ("body constraint") che impone l'uguaglianza degli spostamenti e delle rotazioni dei due nodi.

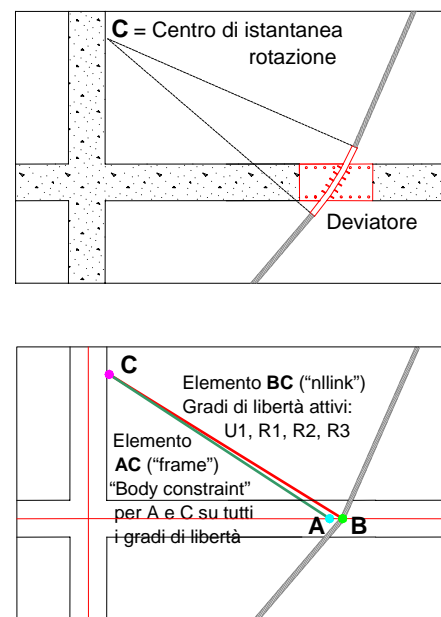


Figura 1. Modello agli elementi finiti simulante il contatto tra cavo ed impalcato

Il modello computazionale del dispositivo fluido-viscoso è il consueto definito nello studio delle diverse tecnologie di protezione sismica che lo includano (Sorace e Terenzi 2005, 2006, 2007a, b). Questo consiste nell'assemblaggio in parallelo di quattro elementi "nllink", con funzioni rispettivamente di molla elastica non lineare, di dissipatore, d'interfaccia reagente a sola compressione ("gap") e d'interfaccia reagente a sola trazione ("hook"). Il collegamento tra dispositivo e cavo può essere diretto, oppure realizzato mediante interposizione di un ulteriore elemento "hook", allo scopo di evitare che il cavo possa andare, anche solo istantaneamente, in compressione, nel rispetto delle reali condizioni fisiche di risposta. La pre-tensione del cavo, pari al valore del precarico statico del dispositivo per ragioni di equilibrio in fase di montaggio del sistema, è assegnata tramite una deformazione termica negativa, tale da determinare il dovuto stato coattivo. La soluzione numerica del problema dinamico non lineare è condotta adottando il metodo "fast nonlinear analysis", che consente di ottenere una rapida convergenza del processo d'integrazione al passo (Wilson 2004, Sorace et al. 2006).

## 3 CONFRONTO TRA LE RISPOSTE DEI MODELLI COMPUTAZIONALE ED ANALITICO

Le risposte del modello computazionale sono state poste a confronto con quelle fornite dal modello analitico del sistema, formulato e convalidato su ba-

se sperimentale in precedenti fasi della ricerca (Sorace et al. 2000, Sorace e Terenzi 2001, 2003a,b, 2004). Le indagini dinamiche di confronto sono state condotte per diverse strutture campione, la più semplice delle quali costituita dal telaio piano in cemento armato mostrato in Figura 2. Per quest'ultimo, in Figura 3 sono mostrati, a titolo di sintesi, i grafici delle storie temporali di spostamento dell'impalcato di sommità e dei cicli forza-spostamento di un dispositivo fluido-viscoso ottenuti, per lo stesso accelerogramma in ingresso, con i due modelli. La configurazione geometrica dei cavi considerata in tali analisi, cosiddetta "a forze orizzontali costanti", verrà discussa nei successivi paragrafi.

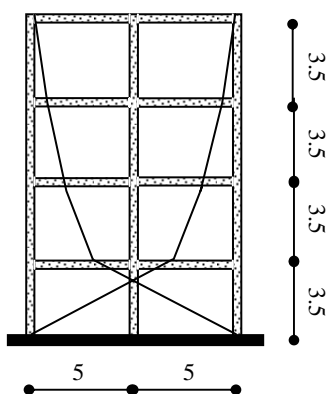


Figura 2. Telaio di riferimento a quattro piani per le indagini numeriche

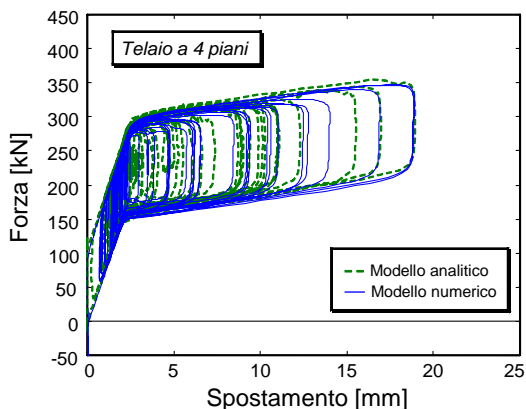
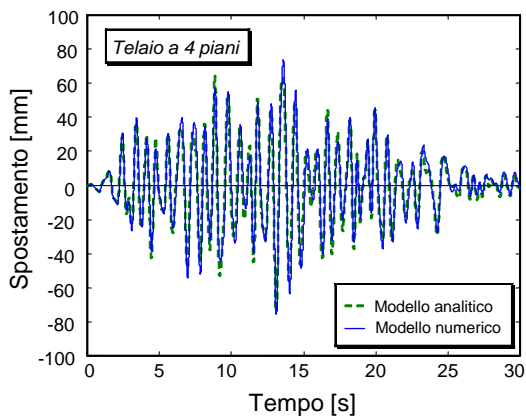


Figura 3. Storie temporali di spostamento del quarto piano e cicli forza-spostamento di un dispositivo fluido-viscoso ottenuti con i modelli computazionale ed analitico

I grafici sopra riportati attestano l'ottima corrispondenza tra le due risposte, le cui lievi differenze su alcuni singoli picchi sono ascrivibili al più ampio intervallo di campionatura in uscita imposto dal modello analitico. Il livello di convergenza osservato in questo caso è confermato anche dai risultati relativi alle restanti strutture di riferimento, qui non presentati, attestando in tal modo l'affidabilità del modello computazionale approntato.

#### 4 COMPLETAMENTO DELL'INDAGINE PARAMETRICA SULL'INFLUENZA DELLA GEOMETRIA DEI CAVI

L'indagine è sintetizzata per il telaio in cemento armato a otto piani mostrato in Figura 4, in aggiunta a quello di quattro piani riportato in Figura 2.

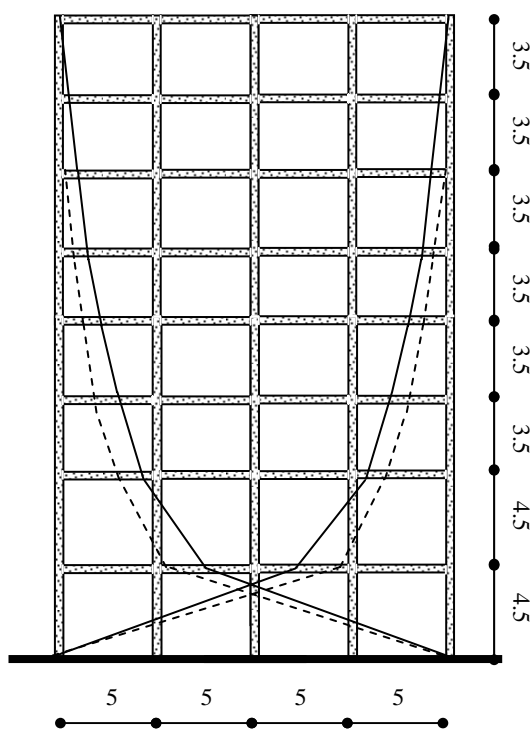


Figura 4. Telaio di riferimento a otto piani per le indagini numeriche

Rispetto alle indagini numeriche precedentemente sviluppate (Sorace e Terenzi 2001), le due strutture sono state nuovamente dimensionate mantenendo inalterata la geometria d'insieme, ma assumendone un iniziale progetto condotto secondo il D.M. 16.1.1996, per zona di terza categoria, piuttosto che in assenza di normativa sismica. Tale scelta è legata all'obiettivo di rendere meno inadeguati i telai di partenza, e dunque ancor più probante l'incremento di prestazione derivante dall'inserimento del sistema di protezione. Ne sono, in tal modo, risultate dimensioni di (30x40) cmxcm per tutti i pilastri e tutte le travi del telaio a quattro impalcati; (40x50) cmxcm per i pilastri e (40x45) cmxcm per le travi del primo e del secondo piano, e di (35x40) cmxcm per i pila-

stri e (35x45) cmxcm per le travi dei restanti piani, per quanto concerne il telaio a otto impalcati.

Il progetto del sistema ha portato all'individuazione dei seguenti valori ottimali per l'area della sezione dei cavi,  $A_c$ , per la forza di pre-tensione da applicare agli stessi,  $F_{0c}$ , e per il coefficiente di smorzamento dei dispositivi fluido-viscosi,  $c$ :  $A_c = 600 \text{ mm}^2$ ,  $F_{0c} = 180 \text{ kN}$ ,  $c = 150 \text{ kN(s/m)}^\alpha$  (telaio a quattro piani);  $A_c = 2100 \text{ mm}^2$ ,  $F_{0c} = 500 \text{ kN}$ ,  $c = 300 \text{ kN(s/m)}^\alpha$  (telaio a otto piani). Le configurazioni esaminate sono costituite, come in precedenza, da curve polinomiali di secondo, terzo e quarto grado (individuate, nel seguito, come P2, P3, P4) e dalla configurazione "a forze orizzontali costanti" (FOC), ottenuta mediante un algoritmo di definizione del tracciato che impone uguali componenti orizzontali alle reazioni di contatto dei cavi ai vari piani (Sorace et al. 2000). Quest'ultima configurazione ha offerto le migliori prestazioni per tutte le strutture sin qui esaminate, seguita dalla curva polinomiale di grado 2.

In aggiunta alle suddette disposizioni, in questa nuova sezione d'indagine sono stati considerati un'ulteriore curva analitica, in forma di potenza con esponente 1,5 (F1,5), ed il tracciato cosiddetto a "bilanciamento delle forze orizzontali" (BFO). Tale geometria, proposta in Peckan et al. (2000), è determinata per via algoritmica al fine di produrre una distribuzione di forze orizzontali tale da bilanciare il momento ribaltante indotto dall'azione sismica, essendo questa valutata sul primo modo di vibrazione della struttura di partenza.

L'indagine numerica è stata condotta con il modello computazionale illustrato nel precedente paragrafo, utilizzando una serie di cinque accelerogrammi artificiali generati a partire dallo spettro di risposta dell'O.P.C.M. 3431/2005, per zona sismica 2 e terreno di tipo B. I risultati sono sintetizzati nelle Figure 5 e 6 tramite gli involupei dei valori medi dei massimi di risposta in termini di spostamenti relativi e tagli di piano, ponendo a confronto, per entrambi i telai, le risposte delle sei configurazioni considerate con quelle in assenza del sistema di protezione (SC). Le prestazioni migliori in termini di spostamenti relativi di piano si rilevano per la disposizione FOC che presenta, unitamente ai minimi picchi, anche la più uniforme distribuzione degli stessi lungo l'altezza. Le riduzioni nei confronti della struttura non protetta risultano pari al 46% ed al 62%, rispettivamente, per il telaio a quattro e quello a otto piani. Prestazioni ancora buone si osservano per i tracciati BFO, P2 e F1,5, pur con un'accentuazione dei picchi sui piani intermedi (con un fattore amplificativo pari quasi a 2 sul secondo piano del telaio a otto impalcati, per BFO, e quasi a 1,5 sul secondo piano del telaio a quattro impalcati, nel caso di P2 e F1,5), ed un andamento dei profili meno regolare. Tali tendenze si accentuano assai più per le geometrie P3 e P4, rendendole inaccettabili.

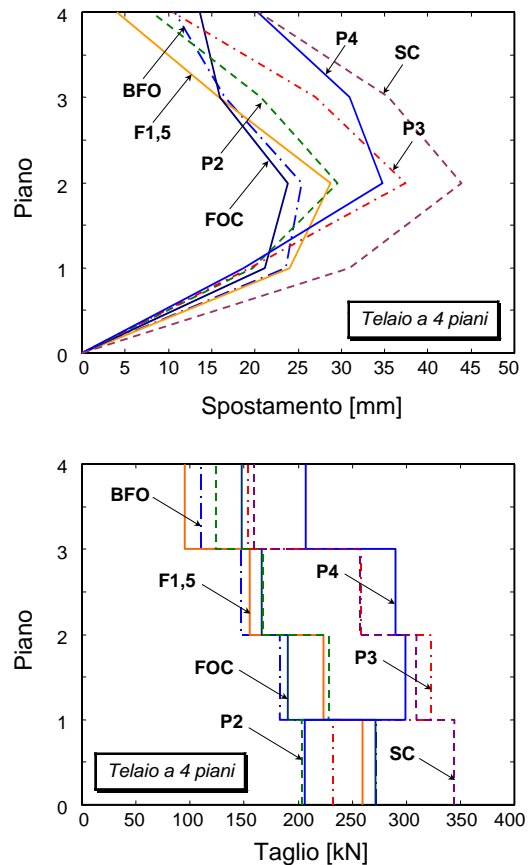


Figura 5. Involuipi dei massimi spostamenti relativi e dei tagli di piano per il telaio a quattro impalcati, al variare della geometria dei cavi

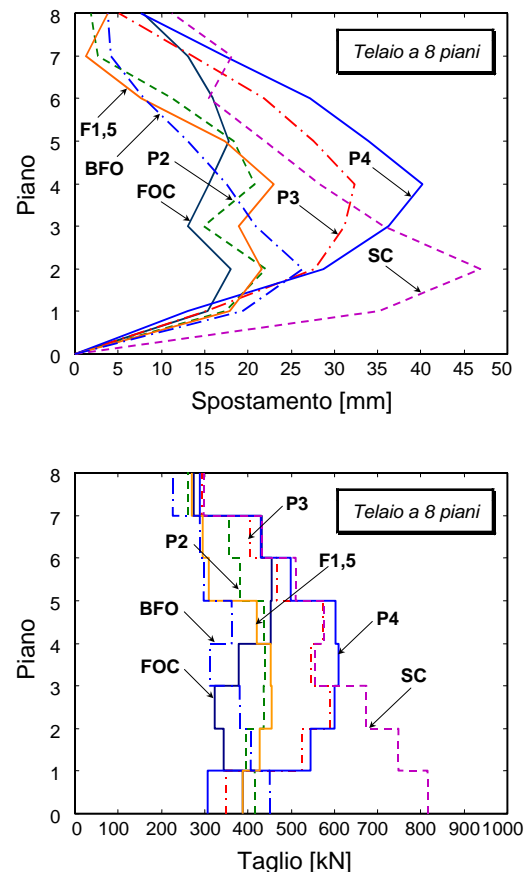


Figura 6. Involuipi dei massimi spostamenti relativi e dei tagli di piano per il telaio a otto impalcati, al variare della geometria dei cavi



Le risposte in termini di tagli risultano concentrate in una fascia di valori relativamente ristretta per i piani intermedi, con scarti massimi contenuti entro il 30% circa per quanto concerne le migliori configurazioni dal punto di vista degli spostamenti (FOC, BFO, F1,5, P2). Relativamente al telaio a otto impalcati, che pone in luce, ovviamente, una più ampia diversificazione di comportamento in funzione della geometria dei cavi, i valori più contenuti del taglio all'ultimo piano si registrano per il caso BFO, e quelli del taglio alla base per le forme FOC e F1,5, come atteso in base ai rispettivi andamenti geometrici.

Nel complesso, le migliori prestazioni per i due telai di riferimento sono ancora offerte dal tracciato FOC, che presenta inoltre il vantaggio di essere caratterizzato da incrementi pressoché costanti di angolo al passaggio da un piano al successivo (il che consente di realizzare un'unica tipologia di deviatori per tutti gli impalcati intermedi, con evidenti vantaggi di produzione). Prestazioni confrontabili si riscontrano per la disposizione BFO, ed ancora soddisfacenti per le geometrie P2 e F1,5, ottenendo in tal modo una certa libertà di scelta progettuale fra questi tracciati a fronte dei vincoli imposti dalle concrete applicazioni, soprattutto per interventi di adeguamento su edifici esistenti.

Un ulteriore aspetto esaminato in merito alla geometria dei cavi ha riguardato l'influenza della quota di ancoraggio superiore degli stessi. Tale sezione dello studio, sviluppata a completamento delle indagini già condotte in (Sorace et al. 2000, Sorace e Terenzi 2002, 2004), ha confermato l'esistenza di un beneficio sufficientemente elevato, per edifici in cemento armato con numero di piani superiore a cinque, a partire da quote di ancoraggio situate ai tre quarti dell'altezza complessiva. Ciò deriva dal fatto che l'inclinazione dei tracciati più efficaci, nella zona terminale alta dell'edificio tende sensibilmente alla verticalità, con conseguente riduzione di capacità reattiva in direzione orizzontale.

A sintesi delle nuove analisi condotte circa questo aspetto, con riferimento al telaio a otto impalcati ed alla configurazione FOC, in Figura 7 sono mostrati i profili medi degli spostamenti relativi e dei tagli massimi di piano, per gli stessi accelerogrammi di cui alle Figure 5 e 6, nell'ipotesi di ancoraggio al sesto impalcato. In entrambi i grafici sono riportati, per un diretto confronto visivo, anche i corrispondenti profili relativi al caso di ancoraggio in sommità, ed alla condizione non protetta. Le riduzioni sugli spostamenti passano dal 62% al 45% per il caso di ancoraggio intermedio, sottolineando una prestazione ancora soddisfacente, ove si consideri che il picco massimo, registrato al secondo impalcato, risulta pari ad un 7.4‰ che potrebbe rappresentare un obiettivo pienamente accettabile in sede di progetto. Riguardo ai tagli di piano, si rileva un'apprezzabile divaricazione tra i valori massimi ottenuti ai quattro

livelli sottostanti l'impalcato di ancoraggio intermedio, variabile il 25% ed il 50% circa, mentre al piano di ancoraggio ed ai soprastanti, nonché alla base, le risposte sono pressoché identiche.

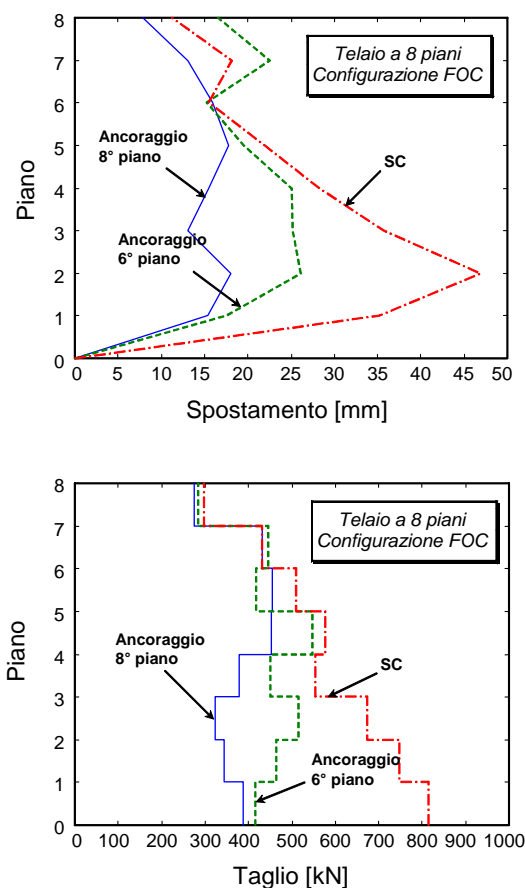


Figura 7. Involuppi dei massimi spostamenti relativi e dei tagli di piano per il telaio a otto impalcati e la configurazione FOC, per due quote di ancoraggio dei cavi

I benefici rispetto alla condizione non protetta sono, comunque, complessivamente, ancora molto elevati, soprattutto per la zona di massimo impegno dell'edificio, situata tra il piano terra ed il terzo piano. Tale constatazione, che trova pieno riscontro negli esiti delle precedenti indagini numeriche condotte al riguardo, induce a valutare attentamente l'opportunità di un ancoraggio non sommitale del sistema, alla luce della proporzionale riduzione di costi derivante.

## 5 APPLICAZIONE AD UN CASO DI STUDIO: L'OSPEDALE DI LATISANA

### 5.1 Generalità

Il comune di Latisana, precedentemente non classificato sismico, è stato inserito in zona 3 a seguito dell'emanazione dell'O.P.C.M. 3274/2003. Ciò ha motivato un particolare interesse verso il possibile adeguamento sismico degli edifici a carattere strategico, tra cui l'Ospedale civile, similmente a quanto è

avvenuto e sta avvenendo in numerosi altri comuni per i quali si è registrata tale nuova condizione.

Nella prospettiva di possibili, future applicazioni a casi analoghi, lo studio qui sintetizzato è stato volto ad individuare una soluzione d'intervento innovativa, in alternativa al progetto di tipo convenzionale che sarà effettivamente attuato. Quest'ultimo prevede la realizzazione di grosse strutture scatolari in cemento armato esternamente ai corpi di fabbrica del complesso edilizio, con mutui collegamenti costituiti da un imponente sistema di travi reticolari in acciaio. L'ipotesi d'intervento basata sull'impiego del sistema a cavi smorzanti è, invece, mirata ad una sua collocazione interna alle costruzioni esistenti, da attuare nel rispetto delle caratteristiche architettoniche e funzionali delle stesse. Lo studio è stato concentrato, in particolare, sull'edificio sede del reparto Chirurgia, che presenta il maggior livello di vulnerabilità nelle condizioni attuali.

In Figura 8 è mostrata un'immagine aerea del complesso dell'Ospedale, arreante i punti di vista relativi alle foto della facciata esterna del padiglione in oggetto (A e B), riportate in Figura 9, ed al prospetto di quella interna (C), riprodotto in Figura 10. Nelle Figure 11 e 12 sono, altresì, illustrate la pianta strutturale del primo piano, allo stato di fatto, e quella architettonica, per la stessa quota, allo stato di progetto. Come rilevabile dalle immagini fotografiche in Figura 9, ai piani superiori la pianta si amplia, includendo anche i corpi in aggetto compresi tra i fili 15 e 20 segnati in Figura 11 (secondo e terzo piano), e 22 e 25 (limitatamente al terzo piano). Al fine di eliminare questi pronunciati sbalzi ed acquisire nuove zone porticate per l'edificio, il progetto architettonico d'intervento prevede il completamento sino al piano terra dei corpi attualmente in aggetto, mediante immissione di nuove pilastrate ad integrazione dei suddetti allineamenti. Di tali variazioni si è tenuto conto nelle analisi condotte, che sono state direttamente riferite al nuovo schema strutturale.



Figura 8. Immagine aerea del complesso dell'Ospedale di Latisana



Figura 9. Immagini della facciata del Padiglione Chirurgia corrispondenti ai punti di vista A (in alto) e B in Figura 8



Figura 10. Prospetto interno del Padiglione Chirurgia corrispondente al punto di vista C in Figura 8

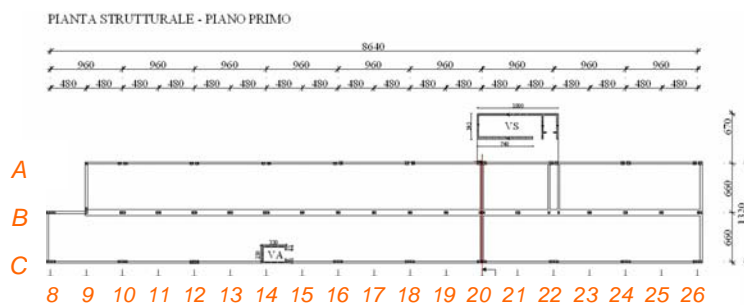


Figura 11. Pianta strutturale del primo piano del Padiglione Chirurgia allo stato attuale

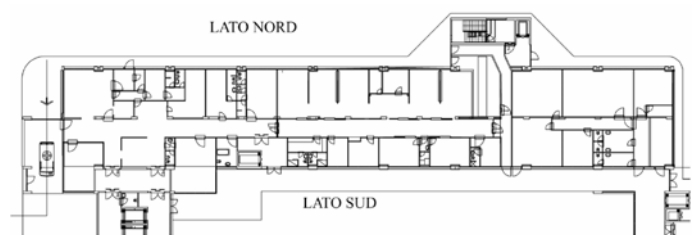


Figura 12. Pianta architettonica del primo piano del Padiglione Chirurgia allo stato di progetto

La pianta strutturale in Figura 11 pone in luce l'esistenza di un giunto tecnico di dilatazione, di ampiezza pari a 4 cm, situato in corrispondenza dell'allineamento 20. L'ipotesi progettuale qui sviluppata ne prevede il mantenimento ed il conseguente adeguamento dimensionale in chiave sismica, nel rispetto delle norme vigenti. L'analisi di accertamento svolta relativamente al corpo di minor ampiezza longitudinale (pari a 29,4 m), delimitato dai fili 20 e 26, ne mostra moderate insufficienze rispetto alle richieste di prestazione formulate nell'O.P.C.M. 3431/2005 e nel D.M. 14/9/2005. Ciò è essenzialmente dovuto alla presenza del nucleo scale-ascensore in cemento armato compreso tra i fili 20 e 22 (Figura 11), che ha dimensioni tali da assorbire la maggior parte degli effetti dell'azione sismica sulla porzione di edificio considerata, incluse le componenti torsionali di piano indotte a causa della collocazione eccentrica del nucleo stesso. L'attenzione è stata quindi appuntata sulla porzione di edificio compresa tra gli allineamenti 8 e 20, di dimensione longitudinale circa doppia (58,2 m) rispetto alla complementare. La struttura presenta, in questo caso, un solo nucleo ascensore in cemento armato, peraltro a sua volta situato in posizione eccentrica tra i fili 14 e 15. La maglia del telaio propone un ampio interasse tra i pilastri perimetrali, pari a 9,6 m (allineamenti longitudinali A e C in Figura 11), che si dimezza per quelli di spina (allineamento B). Le travi sono presenti solo in direzione longitudinale, ad eccezione di un modesto cordolo di chiusura del giunto tecnico sopra menzionato. L'edificio si caratterizza per la forma notevolmente allungata, con un rapporto pari a circa 4,5 tra le dimensioni in pianta (al netto delle attuali zone di aggetto, da trasformare in porticati). In aggiunta alla sfavorevole configurazione planimetrica, si rileva anche una significativa irregolarità in elevazione, determinata dalla presenza di una zona a cinque piani più coperta, compresa tra i fili 8 e 14, e della restante a tre piani più coperta, oltre che degli aggetti sopra menzionati.

Nel complesso, la direzione decisamente più sfavorevole in pianta risulta quella trasversale, essendo tutti i pilastri orditi con il lato maggiore parallelamente all'asse longitudinale. Gli interventi di adeguamento sismico devono quindi essere essenzialmente concentrati sulla direzione trasversale, nonché sulla riduzione degli effetti torcenti di piano rilevati allo stato attuale. In vista del conseguimento di tali principali obiettivi, l'ipotesi basata sull'impiego del sistema a cavi smorzanti ne prevede l'inserimento in corrispondenza degli allineamenti 10, 12, 18 e 20, come posto in evidenza in Figura 13, tramite i relativi segmenti marcati in rosso. Questa collocazione, risultante da un processo iterativo di definizione

condotto in sede di progetto preliminare, consente di ottenere la massima riduzione delle componenti torsionali di risposta, nel rispetto dei vincoli di compatibilità con l'assetto distributivo e funzionale degli spazi interni.

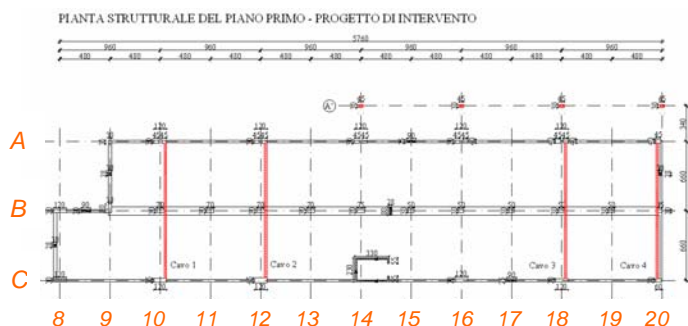


Figura 13. Pianta strutturale del primo piano della porzione del Padiglione Chirurgia oggetto dell'ipotesi di adeguamento, arreca la collocazione prevista per il sistema a cavi smorzanti

Per quanto riguarda la forma geometrica dei cavi, sono state considerate le soluzioni FOC e BFO, emerse come le più efficienti dalle indagini parametriche svolte sui telai piani, discusse al paragrafo precedente. I relativi tracciati sono riportati sulle sezioni architettoniche concernenti i quattro allineamenti oggetto dell'installazione, schematizzate in Figura 14.

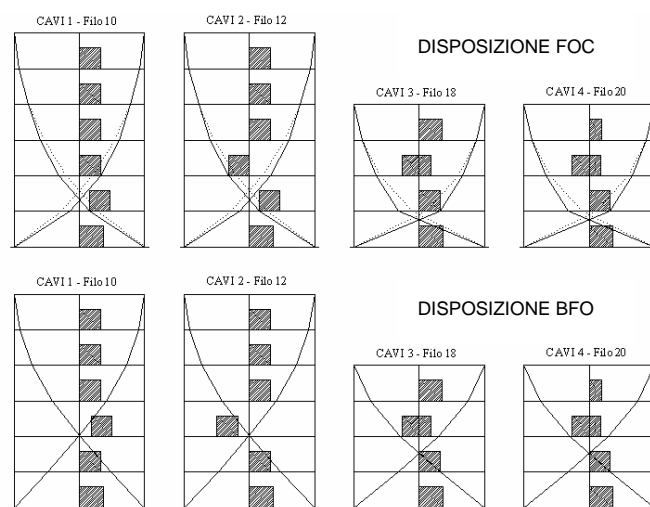


Figura 14. Sezioni schematiche del Padiglione Chirurgia arreca i tracciati dei cavi, per le soluzioni FOC (effettiva e modificata) e BFO

Si osserva che, essendo la geometria FOC prossima ad evitare interferenze con le aperture di comunicazione tra gli spazi interni dell'edificio, presenti sugli allineamenti considerati, nelle analisi di progetto ne è stata esaminata anche una versione lievemente modificata, tale da evitare qualsiasi, seppur periferico attraversamento dei vani porta interessati (tratto continuo in Figura 14, in cui il tracciato teorico è individuato mediante tratto puntinato). Nel caso della geometria BFO, invece, stanti le maggiori interfe-



renze con due aperture presenti nella zona a tre piani, si è preferito mantenere inalterato il tracciato di base, ritenendo accettabile, in termini architettonici e funzionali, lo spostamento di tali due vani alla campata immediatamente adiacente.

## 5.2 Progetto preliminare del sistema

Il progetto preliminare del sistema a cavi smorzanti è stato sviluppato secondo la procedura definita in (Sorace e Terenzi 2002, 2004), separatamente per le due coppie di cavi situate nella zona a sei impalcati (filati 10 e 12) ed in quella a quattro (filati 18 e 20). Tale procedura richiede di definire, quale dato in ingresso, una prestabilita riduzione del periodo del primo modo di vibrazione traslazionale secondo la direzione in cui viene ordito il sistema. In questo caso, partendo da un valore pari a 2,47 s allo stato attuale (secondo periodo in assoluto, dopo quello relativo al primo modo di tipo torsionale), la ricercata riduzione è stata fissata attorno al 30%, a causa dell'elevata deformabilità trasversale dell'edificio. Inoltre, in base sia alle diverse masse strutturali afferenti, sia all'obiettivo di minimizzare gli effetti torcenti di piano, è stato differenziato il progetto delle coppie di cavi da inserire nelle due zone a diversa altezza. In base a tali dati, sono stati determinati i valori sotto riportati dei quattro parametri caratteristici del sistema, rappresentati dalle sopra menzionate grandezze  $A_c$ ,  $F_{0c}$  e  $c$ , e dalla rigidezza elastica di secondo ramo dei dispositivi fluido viscosi,  $K_2$  (al riguardo, si ricorda come  $F_{0c}$  coincida con il precarico statico dei dispositivi,  $F_{0d}$ , per ragioni di equilibrio all'atto del montaggio in opera del sistema).

### - Tracciato FOC

Zona a sei impalcati:

$$\begin{aligned} K_2 &= 7000 \text{ kN/m}; \\ c &= 500 \text{ kN(s/m)}^\alpha; \\ A_c &= 6000 \text{ mm}^2; \\ F_{0c} &= 1250 \text{ kN}. \end{aligned}$$

Zona a quattro impalcati:

$$\begin{aligned} K_2 &= 7000 \text{ kN/m}; \\ c &= 200 \text{ kN(s/m)}^\alpha; \\ A_c &= 2100 \text{ mm}^2; \\ F_{0c} &= 400 \text{ kN}. \end{aligned}$$

### - Tracciato BFO

Zona a sei impalcati:

$$\begin{aligned} K_2 &= 7000 \text{ kN/m}; \\ c &= 500 \text{ kN(s/m)}^\alpha; \\ A_c &= 4500 \text{ mm}^2; \\ F_{0c} &= 1250 \text{ kN}. \end{aligned}$$

Zona a quattro impalcati:

$$\begin{aligned} K_2 &= 7000 \text{ kN/m}; \\ c &= 225 \text{ kN(s/m)}^\alpha; \end{aligned}$$

$$A_c = 2100 \text{ mm}^2;$$

$$F_{0c} = 400 \text{ kN}.$$

Si osserva come il comune valore di  $K_2$  adottato per le quattro configurazioni, pari a 7000 kN/m, corrisponda a dispositivi che, quantunque non presenti nei cataloghi di base del produttore (Jarret SL 2007), risultano ugualmente ottenibili mediante una lavorazione standard. Valori sensibilmente superiori al suddetto avrebbero, viceversa, richiesto la realizzazione di pezzi speciali. In base a tale assunzione, i livelli di rigidezza del sistema necessari a raggiungere la ricercata riduzione del periodo di vibrazione sono stati conseguiti incrementando opportunamente le aree delle sezioni dei cavi. I valori così ricavati per quest'ultime sono, comunque, dell'ordine atteso per installazioni in edifici di dimensioni comparabili a quelle in oggetto (Sorace e Terenzi 2002).

## 5.3 Analisi di verifica finale del progetto

Le analisi finali in campo dinamico non lineare sono state condotte mediante il modello agli elementi finiti mostrato in Figura 15, per l'edificio allo stato attuale, ed in Figura 16, in presenza delle quattro coppie di cavi, realizzato mediante SAP2000NL.

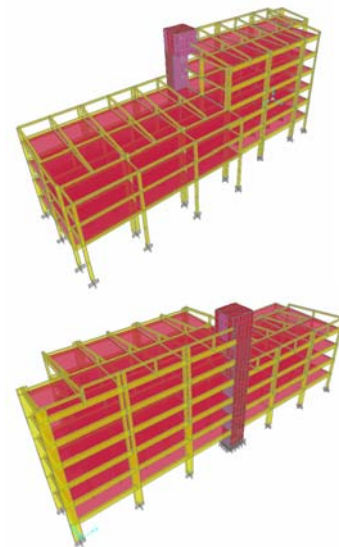


Figura 15. Viste del modello agli elementi finiti dell'edificio allo stato attuale

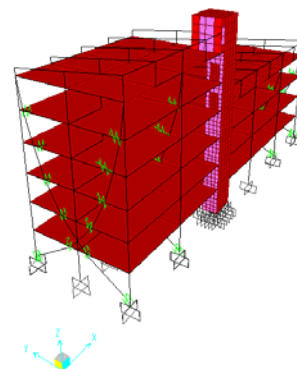


Figura 16. Vista del modello agli elementi finiti dell'edificio in presenza del sistema a cavi smorzanti (sezionato in corrispondenza del filo 10)

Il primo dato che emerge dalle elaborazioni svolte in ambito modale riguarda la soppressione del primo modo di risposta, come detto di tipo torsionale, in condizioni protette. Inoltre, i valori di 1,82 s e 1,77 s del periodo del primo modo di traslazione trasversale, rispettivamente ottenuti per le configurazioni FOC e BFO, ne attestano una riduzione vicina al ricercato 30%, in entrambi i casi.

Le indagini di verifica in campo dinamico non lineare sono state sviluppate in riferimento ai tre stati limite, di collasso, di danno severo e di danno limitato, previsti dall'O.P.C.M. 3431 per gli edifici esistenti. È stata utilizzata, in ingresso, la stessa serie di cinque accelerogrammi spettro-compatibili impiegata nell'indagine numerica sui telai piani discussa al paragrafo precedente. I risultati sono stati sempre valutati in termini di media sulle risposte ai cinque segnali considerati. L'accelerazione di picco al suolo, pari a 0,15 g, è stata incrementata di un valore 1,4 per il fattore d'importanza, stante la destinazione d'uso dell'edificio, e di un valore 1,25 del fattore relativo al profilo stratigrafico del suolo di fondazione (classificato come di tipo D).

Partendo dalle analisi relative allo stato limite di danno severo, in Figura 17 sono riportati i profili degli spostamenti relativi massimi tra i successivi impalcati, normalizzati all'altezza interpiano (SRN), delle quattro pilastrate di doppia riva dell'edificio (A9 e C8, sul lato esterno, A20 e C20, sull'allineamento del giunto tecnico), per la configurazioni BFO e FOC, modificata per le esigenze architettoniche e corrispondente al suo tracciato teorico (FOCT), e per l'edificio allo stato attuale. Tali grafici sottolineano visivamente i benefici indotti dall'introduzione del sistema di protezione, per le tre diverse configurazioni, con riduzioni degli spostamenti dell'ordine di un fattore 4 per la zona a quattro impalcati, e sempre superiore a 2, per gli impalcati sino al quarto, nel caso di quella a sei. Per gli ultimi due piani della zona più alta le riduzioni si attestano su valori di 1,7-1,8, a causa della presenza delle due sole coppie di cavi residue a tali quote. I corrispondenti valori massimi dello spostamento normalizzato risultano inferiori all'1,5%, mentre superano di poco l'1% ai piani più bassi (in particolare, al secondo). Nella zona a quattro impalcati si raggiungono, altresì, valori massimi attorno allo 0,75%. In Figura 18 sono mostrati i profili dei tagli di piano per le quattro condizioni analizzate. I benefici sono decisamente meno rilevanti, come atteso, rispetto a quelli osservati sugli spostamenti, a causa dell'incremento di rigidezza provocato dall'inserimento del sistema di protezione. Tuttavia, la risposta è ben controllata in virtù dello smorzamento offerto dai dispositivi fluido-viscosi.

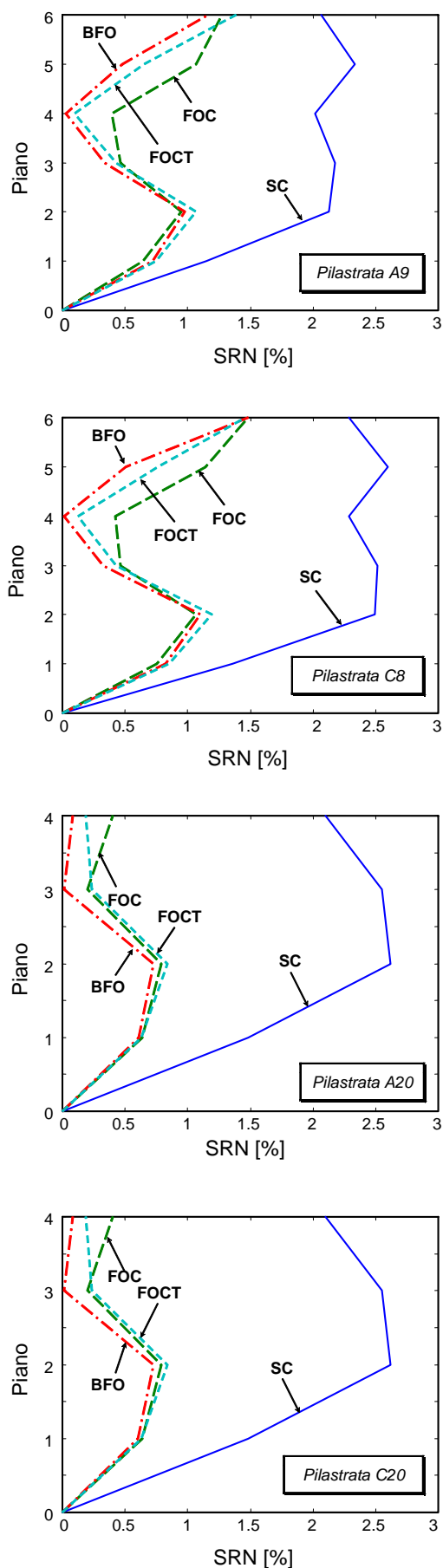


Figura 17. Involuppi dei massimi spostamenti relativi normalizzati tra i successivi impalcati derivanti dalle analisi allo stato limite di danno severo

Al proposito, si sottolinea nuovamente come gli obiettivi dell'intervento siano principalmente quelli

della riduzione degli spostamenti e degli effetti torcenti di piano, effettivamente conseguiti sulla scorta dei risultati ottenuti. Per quanto riguarda le componenti di torsione, infatti, oltre all'eliminazione del primo modo della struttura originaria, si rilevano differenze massime tra gli spostamenti relativi normalizzati degli allineamenti estremi pari allo 0,3%, per il secondo piano, e minori alle restanti quote, in condizioni protette, a conferma di una risposta essenzialmente di tipo traslazionale.

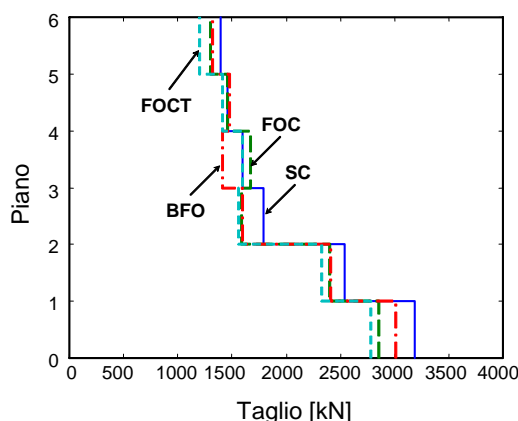


Figura 18. Involuppo dei massimi tagli di piano derivanti dalle analisi allo stato limite di danno severo

Ai suddetti incrementi di prestazione corrisponde un pari beneficio in termini di verifiche di resistenza che, per quanto riguarda i pilastri, risultano positivamente superate nel 74% dei casi, rispetto ad un generale non soddisfacimento per la struttura allo stato attuale. In particolare, i pilastri ancora, seppur moderatamente, insufficienti sono costituiti dagli elementi appartenenti agli ultimi due piani degli allineamenti A e B, per la zona alta, alle intere stilate A9 e C20, e da due elementi per ciascuna delle stilate C8, B20 e A20. Per tali pilastri è stato previsto uno specifico intervento di rinforzo, mediante tessuti in materiale composito fibrorinforzato, da realizzare complementariamente all'installazione del sistema di protezione. Per la sola stila A9 si è optato per un'incamiciatura in cemento armato, stante le esigue dimensioni (35x30 cmxcm) e la combinazione particolarmente sfavorevole delle componenti di flessione secondo i due assi coordinati che la caratterizzano, a causa della collocazione di bordo. Un intervento di consolidamento è, inoltre, necessario anche per il vano ascensore, da realizzare in questo caso tramite l'incremento, da 20 a 30 cm, dello spessore dei setti costituenti.

Passando all'esame dei risultati delle analisi allo stato limite di collasso, si registra un più che ampio soddisfacimento dei requisiti richiesti dall'O.P.C.M. 3431, rilevandosi soltanto moderate plasticizzazioni in circa il 30% dei pilastri e delle travi, riparabili a seguito del corrispondente evento sismico, caratte-

rizzato da una probabilità di superamento del 2% in 50 anni. Di fatto, la condizione di danneggiamento indotta da questo evento è inferiore a quella individuata dalla stessa Ordinanza per lo stato limite di danno severo, determinando una "scalatura" di un livello abbondante di prestazione in condizioni protette. Lo spostamento massimo dei dispositivi fluido-viscosi è pari a 83 mm, ampiamente inferiore alla corsa massima disponibile, di 200 mm.

Per quanto concerne, infine, le verifiche allo stato limite di danno limitato, si rilevano valori dello spostamento relativo normalizzato sempre inferiori al 5‰ (valore massimo pari al 4,6‰ al secondo piano), rispettando, in tal modo, la limitazione richiesta dall'O.P.C.M. 3431, che coincide con quella imposta agli edifici di nuova realizzazione con tamponature collaboranti.

Un'ultima considerazione riguarda il confronto tra le risposte delle tre configurazioni esaminate, che mostra una sostanziale equivalenza fra i tracciati FOCT e BFO, e risultati lievemente inferiori per il caso FOC modificato per le esigenze architettoniche (cui corrispondono i valori di risposta massima sopra riportati per i tre stati limite). Ai fini di una scelta finale di progetto, tale lieve abbattimento di prestazione risulta, tuttavia, pienamente accettabile, essendo comunque garantito il pieno soddisfacimento delle diverse richieste normative, come sopra osservato. Pertanto, i dettagli costruttivi d'installazione, riportati nel successivo paragrafo, sono riferiti alla configurazione FOC modificata. Ovviamente, da un punto di vista tecnologico nulla cambierebbe ove si adottassero i tracciati FOCT o BFO, ritenendo compatibili le relative modeste modifiche architettoniche.

#### 5.4 Dettagli costruttivi d'installazione

In Figura 19 è riprodotta la sezione trasversale dell'edificio rappresentativa degli allineamenti 10 e 12, per la zona alta, con le coppie di cavi installate secondo il tracciato FOC modificato. Il montaggio è concepito in aderenza ai pilastri, con travi in acciaio di collegamento tra cavi e struttura intelaiata poste all'intradosso degli impalcati. Il passaggio di ciascun cavo avviene direttamente sui solai, con demolizioni localizzate di modesta entità.

Le connessioni delle travi di collegamento al telaio con i pilastri ed i solai interessati (particolare 1 e sezione A-A di Figura 19) sono mostrate in Figura 20. I dettagli del deviatore tipo di piano (sezione B-B di Figura 19 e relativa sezione longitudinale C-C), e degli ancoraggi superiore (particolare 3 di Figura 19) ed inferiore (particolare 4 di Figura 19) dei cavi, sono illustrati nelle Figure 21, 22 e 23, rispettivamente.

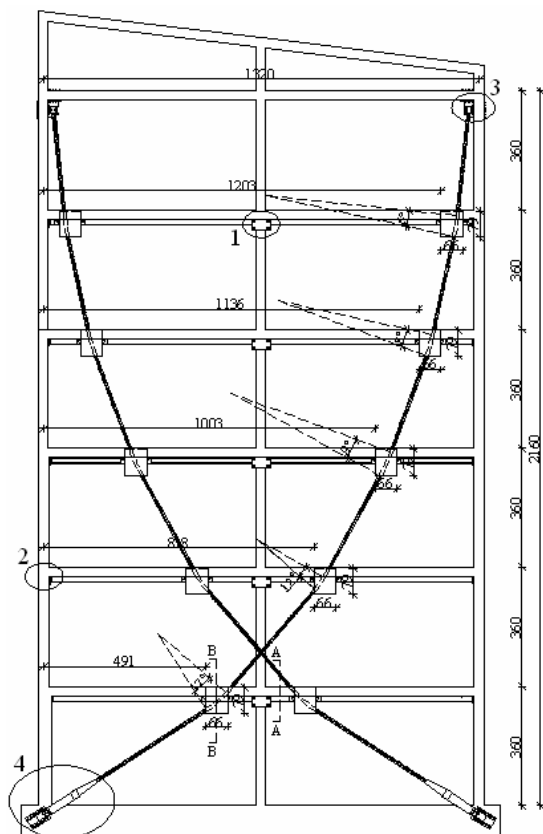
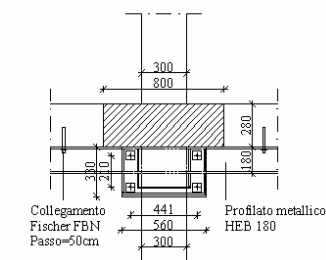


Figura 19. Sezione trasversale corrispondente agli allineamenti 10 e 12, e tracciato delle relative coppie di cavi

Nel complesso, l'installazione del sistema non propone particolari problematiche tecniche, e può pertanto essere eseguita, con le opportune caratterizzazioni dettate dallo specifico caso di studio analizzato, secondo i criteri generali e di dettaglio formulati nell'ambito dei precedenti studi (Sorace e Terenzi 2003, 2004).

**Particolare 1**  
Piastra di collegamento tra i profilati metallici e il pilastro esistente.  
Scala 1:20 - Quote in mm



**Sezione A-A**  
Collegamento tra i profilati metallici e la struttura esistente.  
Scala 1:20 - Quote in mm

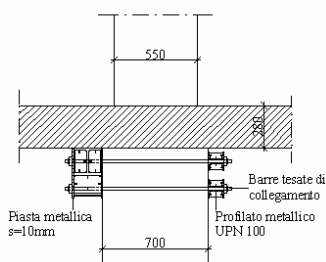
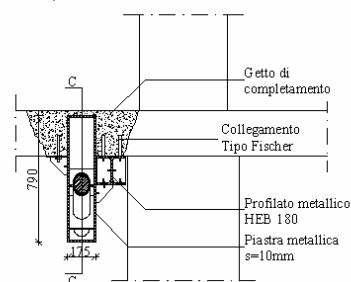


Figura 20. Connessione della trave di collegamento con i pilastri ed i solai interessati (particolare 1 e sezione A-A di Figura 19)

**Sezione B-B**  
Deviatore di piano  
Scala 1:20 - Quote in mm



**Sezione C-C**  
Deviatore di piano  
Scala 1:20 - Quote in mm

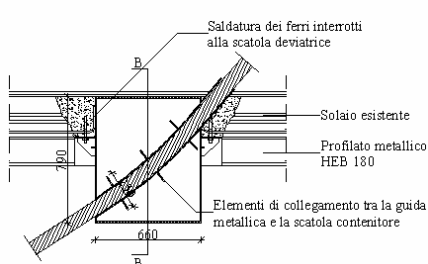


Figura 21. Deviatore tipo e relativo dettaglio d'installazione (sezione B-B di Figura 19 e corrispondente sezione longitudinale)

**Particolare 3**  
Ancoraggio del cavo in sommità  
Scala 1:20 - Quote in mm

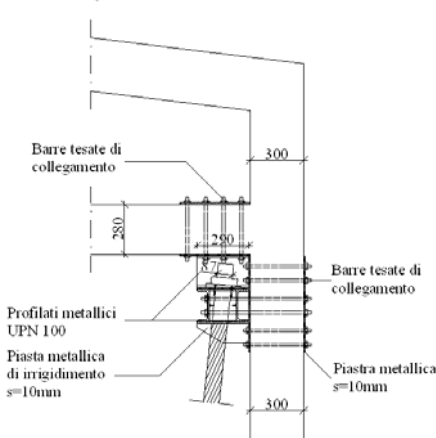


Figura 22. Ancoraggio superiore del cavo e relativo dettaglio d'installazione (particolare 3 di Figura 19)

**Particolare 4**  
Ancoraggio del cavo in fondazione  
Scala 1:20 - Quote in mm

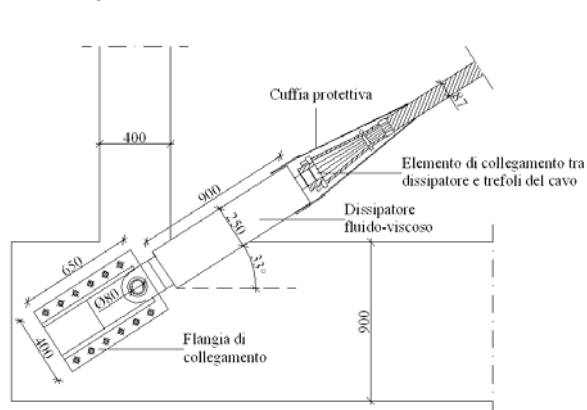


Figura 23. Ancoraggio inferiore del cavo e relativo dettaglio d'installazione (particolare 4 di Figura 19)



## 6 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Le nuove analisi sul sistema a cavi smorzanti presentate in questa memoria hanno condotto ad una definitiva convalida del modello computazionale messo a punto, per confronto con i risultati ottenuti, su più strutture campione, mediante il corrispondente modello analitico precedentemente formulato.

Le indagini sviluppate su due di queste hanno consentito, altresì, di valutare in via conclusiva l'influenza della forma geometrica dei cavi sulla prestazione del sistema, esaminando ulteriori tracciati rispetto a quelli sin qui considerati. La configurazione "a forze orizzontali costanti" ha confermato le migliori capacità di risposta, sostanzialmente eguagliate da quelle della geometria corrispondente al criterio del "bilanciamento delle forze orizzontali", proposto da altri autori.

L'applicazione simulata al caso di studio costituito dall'Ospedale di Latisana, rappresentativo di una significativa classe di edifici pre-normativi in cemento armato di simili caratteristiche, ha condotto a dimensioni ragionevolmente limitate degli elementi costituenti e ad un contenuto numero di cavi da installare, al fine di conseguire i livelli di prestazione ricercati in sede di progetto. Ciò comporta un sostanziale contenimento sia del livello d'impatto architettonico sia dei costi di un intervento di adeguamento sismico così concepito, in confronto a quelli di soluzioni di tipo convenzionale, sottolineando le potenzialità d'impiego del sistema a cavi smorzanti anche in un settore edilizio di così rilevante interesse.

## RINGRAZIAMENTI

Lo studio presentato in questa memoria è stato condotto nell'ambito delle attività relative al Progetto ReLUIS-DPC 2005-2008 – Linea di ricerca 7.

## BIBLIOGRAFIA

Behloul, M., Forni, M., Gatti, F., Krief, A., Sorace, S., Appleton, J., Domage, J.B., 2001. New technology to protect structures against earthquake – SPIDER Project. *7<sup>th</sup> International Seminar on Seismic isolation, passive energy dissipation and active control of vibrations of structures*. Assisi, Italy, 437-445.

CSI, 2006. *Sap2000NL. Structural Analysis Programs - Theoretical and Users Manual*, Version No. 10.09, Computers & Structures, Inc., Berkeley, CA.

Jarret SL, 2007. Shock-control technologies. URL <http://www.introini.info>.

Pekcan, G., Mander, J.B., and Chen, S.S., 2000. Balancing lateral loads using tendon-based supplemental damping sys-

tem. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 126, 896-905.

Sorace, S., Agnolin, I., Suraci, S., Terenzi, G., 2000. Design and optimisation of damped cable system characteristics to suit application. *Report to EC No. EVG1-CT-1999-0013 SPIDER/1.1/UD/SSO/01/VF-C*, SPIDER Deliv. No. 1.

Sorace, S., Terenzi, G., 2001. Deformation and strength-based assessment of damped cable system for seismic retrofit of R/C structures. *5<sup>th</sup> World Congress on Joints, Bearings and Seismic Systems for Concrete Structures*. Rome, Italy, Paper 23, CD-ROM.

Sorace, S., Terenzi, G., 2002. Design procedure for DCS implementation. *Report to EC No. EVG1-CT-1999-0013 SPIDER/8.1-2/UD/SSO/03/VF-C*, SPIDER Deliv. No. 17.

Sorace, S., Terenzi, G., 2003a. An advanced seismic protection technology: the damped cable system. *ASSCCA '03 – International Conference on Advances in Structures*. Sydney, Australia, 1185-1192.

Sorace, S., Terenzi, G., 2003b. Verification of damped cable system in the seismic rehabilitation of buildings. *ERES '03 – 4th Conference on Earthquake Resistant Engineering Structures*. Ancona, Italy, 283-292.

Sorace, S., Terenzi, G., 2004. Il sistema a cavi smorzanti: sintesi delle ricerche a carattere strutturale svolte nell'ambito del Progetto SPIDER. *11° Convegno Nazionale ANIDIS "L'Ingegneria Sismica in Italia"*. Genova, Articolo J2-02, CD-ROM.

Sorace, S., Terenzi, G., 2005. Application of a combined base isolation/supplemental damping seismic protection strategy to a public building in Florence. *International Conference "250th Anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake"*. Lisbon, Portugal, 481-486.

Sorace, S., Terenzi, G., 2006. Modellazione analitica e computazionale dei contatti scorrevoli di piano nel sistema a cavi smorzanti. *16° Convegno Nazionale di Meccanica Computazionale – GIMC 2006*. Bologna, Articolo 45, CD-ROM.

Sorace, S., Terenzi, G., Bandini, L., 2006. Le potenzialità della "FNA" nell'analisi dinamica non lineare di strutture dotate di sistemi avanzati di protezione sismica. *16° Convegno Nazionale di Meccanica Computazionale – GIMC 2006*. Bologna, Articolo 46, CD-ROM.

Sorace, S., Terenzi, G., 2007. Retrofit hypotheses of a pre-normative steel school building by fluid viscous damper-based technologies. *6<sup>th</sup> International Conference on Steel and Structural Engineering*. Oxford, U.K., Paper 044.

Sorace, S., Terenzi, G., 2007. Seismic protection of frame structures by fluid viscous damped braces. To appear in the *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 133.

Wilson, E.W., 2002. *Three dimensional static and dynamic analysis of structures*, Computers & Structures, Inc., Berkeley, CA.